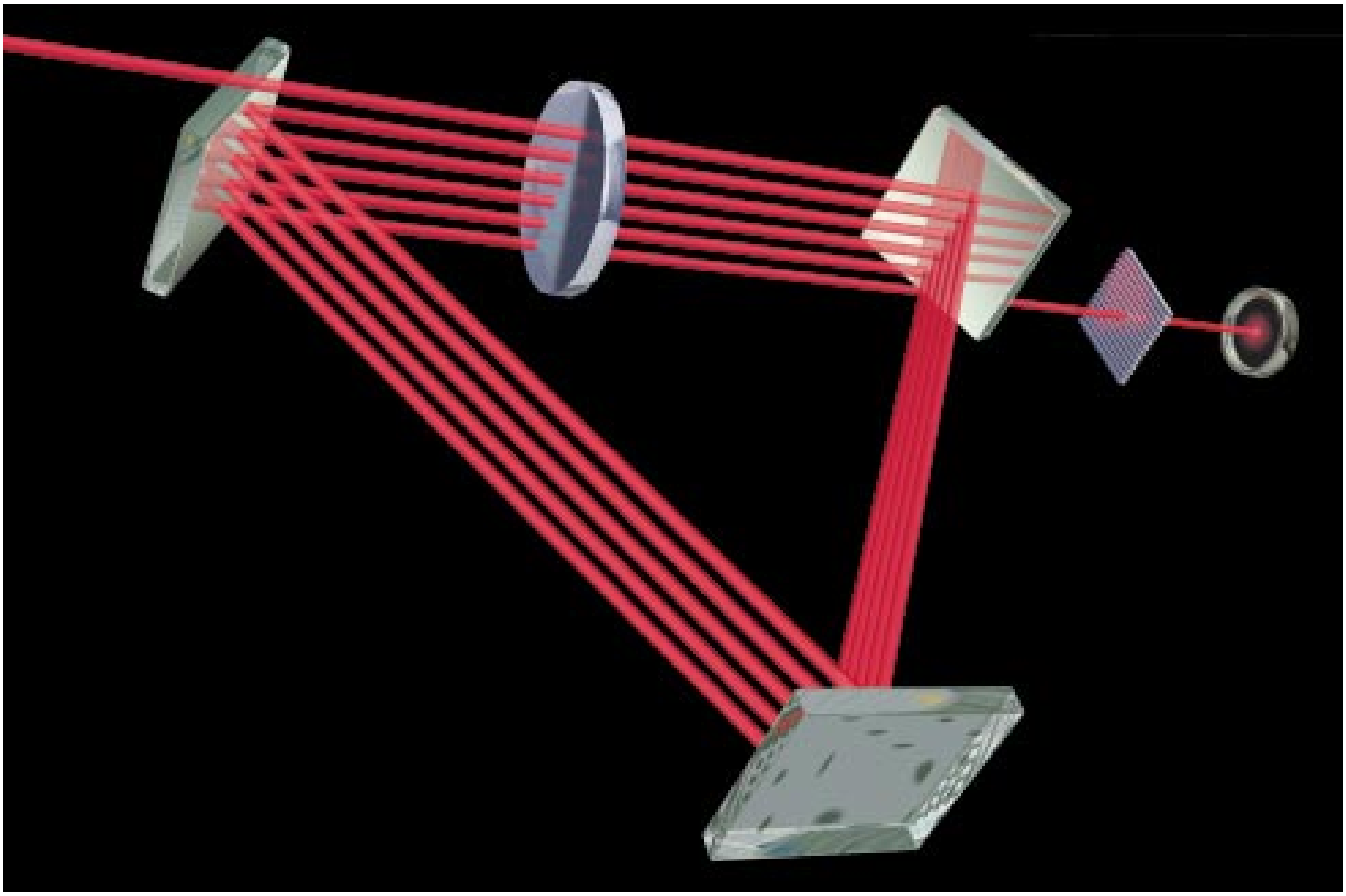


MICHAEL GOODMAN

Kwantowe widzenie w ciemności

Optyka kwantowa dowodzi istnienia pomiarów bez oddziaływania: wykrywania obiektów bez użycia światła – lub czegoś innego – na nie padającego

Paul Kwiat, Harald Weinfurter i Anton Zeilinger

W mitologii greckiej heros Perseusz staje przed zadaniem nie do pozazdroszczenia: ma pokonać przerażającą Meduzę. Na głowie tej bestii zamiast włosów rosną węże i jest tak ohydna, że nawet rzut oka na nią natychmiast przemienia nieszczęsnego obserwatora w kamień. W jednej z wersji tego mitu Perseusz unika fatalnego losu, inteligentnie posługując się tarczą, która odbija obraz Meduzy w jej kierunku i w ten sposób ona sama zamienia się w kamień. Ale co by się stało, gdyby Perseusz nie miał tak świetnie wypolerowanej zbroi? Przypuszczalnie byłby zgubiony. Gdyby zamknął oczy, nie znalazłby swojego celu. A gdyby odważył się zerknąć, mogłoby się zdarzyć, że odrobina światła padającego na Meduzę odbiłaby się i trafiła do jego oka; wówczas „zobaczyłby” potwora i byłby załatwiony.

W świecie fizyki tę kłopotliwą sytuację można szybko ocenić dzięki pozornie niewinnemu, prawie oczywistemu twierdzeniu, które w 1962 roku sformułował Dennis Gabor, odkrywca holografii i laureat Nagrody Nobla. Mówi ono, że nie da się dokonać żadnej obserwacji bez udziału co najmniej jednego fotonu – podstawowej cząstki lub kwantu światła – padającego na obserwowany obiekt. W ciągu kilku minionych lat fizycy zajmujący się coraz bardziej dziwacznym światem optyki kwantowej przekonali się jednak, że to twierdzenie jest nie tylko dalekie od oczywistości, ale wręcz błędne. Teraz już wiemy, jak można ustalić obecność jakiegoś obiektu zupełnie bez udziału fotonów, które byłyby z nim w kontakcie.

Taki pomiar wydaje się czymś niedorzecznym – jak można go dokonać, skoro nie ma żadnego oddziaływania? Jest to prawdziwa zagadka dla mechaniki klasycznej, czyli działu fizyki, który zajmuje się opisem ruchów piłki nożnej, planet i tym podobnych niezbyt małych obiektów. Natomiast mechanika kwantowa – nauka o elektronach, fotonach i innych cząstkach z królestwa atomu – ujmuje tę sprawę inaczej. W dziedzinie mechaniki kwantowej, wykonując sprytnie zaplanowane doświadczenie, rze-

WIĄZKA LASEROWA, biegnąc po spiralnej ścieżce, która prowadzi do detektora fotonów, jest ilustracją tzw. kwantowego efektu Zenona, będącego elementem pomiarów bez oddziaływania.

czywiście można przeprowadzać pomiary bez oddziaływania[1]. Gdyby Perseusz został uzbrojony również w znajomość fizyki kwantowej, mógłby obmyślić sposób „zobaczenia" Meduzy bez udziału światła padającego na Gorgonę i następnie trafiającego do jego oka. Mógłby spojrzeć na nią, nie patrząc.

Takie kwantowe kuglarstwo podsuwa wiele pomysłów budowy układów detekcyjnych, które mogłyby znaleźć zastosowanie w realnym świecie. Chociaż może jeszcze bardziej interesujące są niezwykłe implikacje filozoficzne. Najłatwiej je zrozumieć, odwołując się do eksperymentu myślowego, czyli do sprawnej analizy, w której są zawarte wszystkie istotne cechy rzeczywistego doświadczenia, a jednocześnie unika się pojawiających się w praktyce komplikacji.

Jako doświadczenie myślowe rozważmy zatem odmianę gry w dwie karty, w której wykorzystuje się dwie skorupki orzecha i kamyk ukryty pod jedną z nich. Nie jest to jednak zwyczajny kamyk, pod wpływem światła bowiem rozpada się w pył. Gracz próbuje odgadnąć, gdzie znajduje się kamyk. Nie wolno mu jednak go odsłonić ani też w jakiś inny sposób zakłócić jego stanu. Jeśli kamyk zamieni się w pył, się przegrywa.

Początkowo wydaje się, że wygrana w ogóle nie jest możliwa, ale wkrótce się przekonujemy, że jeśli gracz godzi się zwyciężać tylko w połowie przypadków, to prostą strategią jest odkrywanie skorupki, pod którą nie spodziewa się znaleźć kamyka. Jeśli mu się uda, będzie wiedział, że kamyk leży pod drugą skorupką, mimo że go tam nie widział. Żeby wygrać, stosując tę strategię, trzeba oczywiście więcej razy odkryć pustą skorupkę, niż uda się to szczęśliwie odgadnąć.

Następnie idziemy krok dalej w modyfikacji gry, pozornie ją upraszczając, ale w rzeczywistości odbierając możliwość zwycięstwa graczowi, który działa w zakresie fizyki klasycznej. Mamy teraz tylko jedną skorupkę i losową szansę znalezienia – lub nie – pod nią kamyka. Zadaniem gracza jest powiedzenie, czy kamyk znajduje się pod skorupką, ale tak jak poprzednio bez wystawiania go na działanie światła.

Załóżmy, że kamyk leży pod skorupką. Jeżeli gracz nie zajrzy pod nią, to nie uzyska żadnej informacji. Jeżeli zaś zajrzy, to przekona się, że kamyk tam był; ponieważ jednak dopuścił do niego światło, zobaczy już tylko kupkę pyłu. Gracz może próbować osłabić światło na tyle, by do minimum zmniejszyć prawdopodobieństwo, że padnie na kamyk. Aby go jednak zobaczyć, to z definicji musi go oświetlić choćby jednym fotonem, co oznacza przegraną.

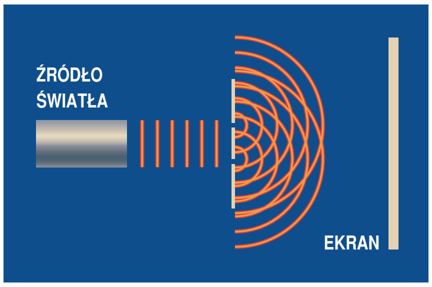
Elitzur, Vaidman i bomba

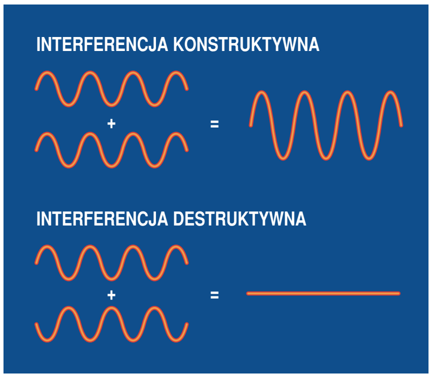
W celu udramatyzowania gry Avshalom C. Elitzur i Lev Vaidman, dwaj fizycy z Uniwersytetu w Tel Awiwie, potraktowali kamyk jak „superbombę", która wybuchłaby, gdyby padł na nią chociaż jeden foton. Zadanie zatem sprowadza się do stwierdzenia, czy kamyk bomba znajduje się pod skorupką, ale bez jej podnoszenia.

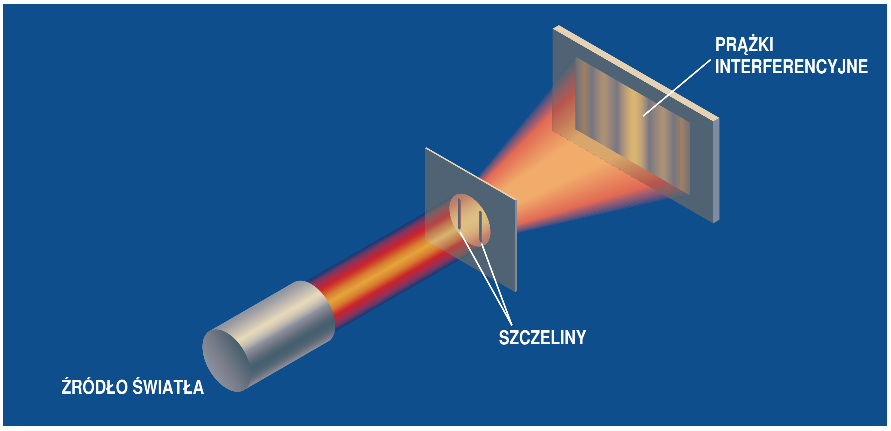
Elitzur i Vaidman byli pierwszymi naukowcami, którzy podali jakiś sposób rozwiązania tego problemu. Ich metoda w najlepszym razie sprawdza się tylko w przypadku połowy zdarzeń. Niemniej jednak niezbędne było wykazanie, że w ogóle jest nadzieja na zwycięstwo w tej grze.

W proponowanej metodzie wykorzystuje się podstawowe własności światła. Wspominaliśmy już, że światło składa się z fotonów, które mają cechy upodobniające je do cząstek. Jednakże światło może też wykazywać odmienny, falowy charakter, który przejawia się w zjawisku nazywanym interferencją. Interferencja to sposób, w jaki dwie fale nakładają się na siebie. Na przykład w dobrze znanym doświadczeniu z dwiema szczelinami światło przechodzi przez dwie szczeliny, umieszczone jedna nad drugą, i pada na znajdujący się w pewnej odległości ekran. Na ekranie ukazują się jasne i ciemne prążki [*ilustracja obok*]. Jasne prążki odpowiadają miejscom, w którym grzbiety i doliny fal świetlnych wychodzących z jednej szczeliny dodają się w sposób konstruktywny z grzbietami i dolinami fal wychodzących z drugiej szczeliny. Ciemne pasma odpowiadają interferencji destruktywnej, w wyniku której grzbiety fal z jednej szczeliny znoszą się z dolinami fal z drugiej szczeliny. Zagadnienie to można przedstawić także w ten sposób, że jasne prążki odpowiadają takim obszarom ekranu, gdzie prawdopodobieństwo padania fotonów jest duże, podczas gdy ciemne prążki to obszary o małym prawdopodobieństwie padania fotonów.

Zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej, jeśli tylko istnieje więcej niż jedna z możliwych dróg uzyskania danego wyniku, a ponadto w żaden sposób tych dróg nie można rozróżnić, zachodzi interferencja (ta definicja jest bardziej ogólna od zwykle podawanych w podręcznikach). W doświadczeniu z dwiema szczelinami światło może dotrzeć do



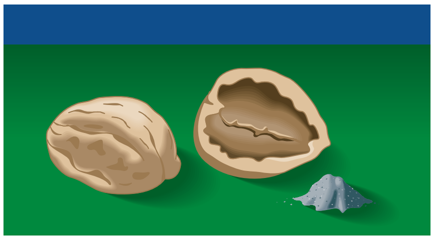




JARED SCHNEIDMAN DESIGN

INTERFERENCJA występuje wtedy, kiedy laser oświetla dwie szczeliny, które wytwarzają koncentryczne fale świetlne nakładające się na siebie *(u góry)*. Fale mogą się dodawać konstruktywnie lub destruktywnie *(pośrodku)*, dając na ekranie charakterystyczne prążki interferencyjne – jasne i ciemne pasma *(na dole)*.

JARED SCHNEIDMAN DESIGN



FIZYKÓW GRA W DWIE KARTY jest eksperymentem myślowym, który doskonale ilustruje możliwości pomiarów bez oddziaływania. Pod jedną ze skorupek leży osobliwy kamyk; jeśli padnie nań światło, obróci się w pył. Jak ustalić, pod którą skorupką znajduje się kamyk?

ekranu po dwóch możliwych drogach (wychodząc z górnej lub dolnej szczeliny) i nie podejmuje się żadnej próby określenia, które fotony przez którą szczelinę przeszły. Gdybyśmy w jakikolwiek sposób mogli stwierdzić, przez którą szczelinę przeszedł foton, to interferencja w ogóle by nie wystąpiła i foton mógłby trafić w dowolne miejsce na ekranie. W rezultacie nie pojawiłby się obraz prążków. Mówiąc wprost: bez dwóch nierozróżnialnych dróg światła nie może wystąpić interferencja.

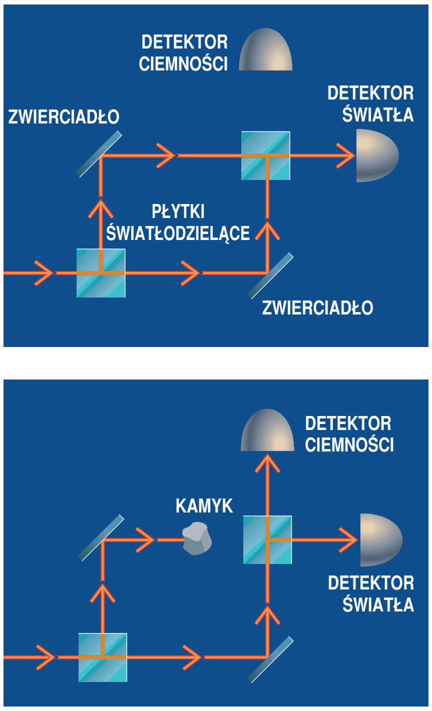
Na pierwsze urządzenie, które miało stanowić hipotetyczny układ pomiarowy, Elitzur i Vaidman wybrali interferometr – przyrząd składający się z dwóch zwierciadeł i dwóch płytek światłodzielących. Światło wchodzące do interferometru pada na płytkę światłodzielącą, która je kieruje wzdłuż dwóch dróg optycznych: górnej i dolnej. Drogi te łączą się ze sobą na drugiej płytce światłodzielącej. Stąd światło jest przesyłane do jednego z dwóch detektorów fotonów [*ilustracje na dole*]. W ten sposób między źródłem światła i detektorem interferometr stwarza każdemu fotonowi możliwość przejścia po dwóch równorzędnych ścieżkach.

Jeżeli interferometr zostanie tak ustawiony, aby długość obu dróg światła była dokładnie taka sama, cały układ w istocie zamienia się w doświadczenie z dwiema szczelinami. Różnica polega głównie na tym, że w miejscu ekranu, na którym są widoczne jasne i ciemne prążki, znajdują się detektory fotonów. Jeden z nich jest tak umieszczony, aby rejestrował tylko fotony odpowiadające jasnym prążkom obrazu interferencyjnego (nazwijmy go detektorem światła). Drugi rejestruje ciemne prążki – innymi słowy, nigdy na niego nie pada żaden foton (ten nazwijmy detektorem ciemności).

Kamyk na drodze

Co się stanie, jeśli na jednej z dróg, powiedzmy na tej górnej, położymy kamyk? Przyjmując, że pierwsza płytka światłodzieląca działa losowo, z 50-procentowym prawdopodobieństwem możemy uznać, że foton wybierze górną ścieżkę, padnie na kamyk (ewentualnie spowoduje eksplozję superbomby) i nigdy nie dotrze do drugiej płytki światłodzielącej.

Jeżeli foton wybierze dolną drogę, wówczas nie padnie na kamyk. Ponadto na drugiej płytce światłodzielącej już nie wystąpi interferencja, ponieważ foton mógł do niej dotrzeć tylko jedną ścieżką. A zatem na drugiej płytce światłodzielącej foton ponownie losowo wybierze swoją dalszą drogę. Może zostać odbity i trafić do detektora światła; taki wynik nie da jednak żadnej informacji, bo gdyby kamyka w ogóle nie było, to tak właśnie by się stało. Ale foton może również trafić do detektora ciemności. Jeśli to nastąpi, z całą pewnością będziemy wiedzieli, że na jednej ze ścieżek interferometru znajduje się jakiś obiekt; gdyby go nie było, to detektor ciemności nie mógłby kliknąć. A ponieważ wysłaliśmy tylko jeden foton i został on zarejestrowany przez detektor ciemności, nie mógł mieć kontaktu z kamykiem.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

DOŚWIADCZENIE Elitzura–Vaidmana pozwala fotonowi wybrać jedną z dwóch dróg. Elementy optyczne są tak ustawione (*u góry*), że fotony zawsze trafiają do detektora światła (odpowiada to interferencji konstruktywnej) i nigdy do detektora ciemności (odpowiednika interferencji destruktywnej). Jednak obecność kamyka na jednej z dróg sprawia, że foton sporadycznie trafia do detektora ciemności (*na dole*), co świadczy o tym, że został dokonany pomiar bez oddziaływania.

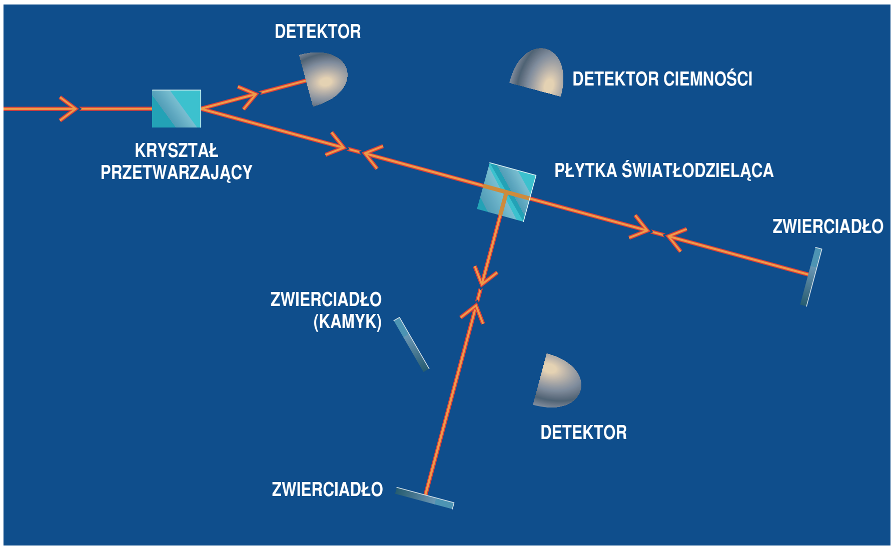
W taki oto sposób udało nam się przeprowadzić pomiar bez oddziaływania – ustaliliśmy obecność kamyka bez oddziaływania z nim.

Chociaż ten układ działa tylko w niektórych przypadkach, pragniemy podkreślić, że kiedy działa, robi to doskonale. Cała kwantowomechaniczna magia, która tkwi u podstaw tej sztuki, bierze się stąd, że wszystko, łącznie ze światłem, wykazuje dwoistą naturę – falową i zarazem cząstkową. Kiedy interferometr jest pusty, światło zachowuje się jak fala. Może dotrzeć do detektorów, biegnąc jednocześnie po dwóch ścieżkach, co prowadzi do interferencji. Kiedy natomiast na jednej ze ścieżek leży kamyk, światło zachowuje się jak niepodzielna cząstka i podąża tylko jedną z dróg. Sama obecność kamyka wyklucza możliwość wystąpienia interferencji, nawet jeśli foton nie musi z nim oddziaływać.

Aby zademonstrować pomysł Elitzura i Vaidmana, dwa lata temu wspólnie z Thomasem Herzogiem, obecnie pracującym na Uniwersytecie w Genewie, przeprowadziliśmy doświadczenie, które było realizacją ich eksperymentu myślowego i w ten sposób wykazaliśmy, że można zbudować urządzenie służące do pomiarów bez oddziaływania. Źródłem pojedynczych fotonów był specjalny kryształ nieliniowy. Kiedy kierowano na niego ultrafioletowe fotony wysyłane przez laser, zdarzało się niekiedy, że były one „przetwarzane” (down-converted) na dwa bliźniacze fotony o energii o połowę mniejszej, które rozbiegały się pod kątem około 30°. Wykrywając jeden z nich, mieliśmy absolutną pewność, że istnieje także drugi, siostrzany foton, który następnie kierowaliśmy do naszego układu doświadczalnego.

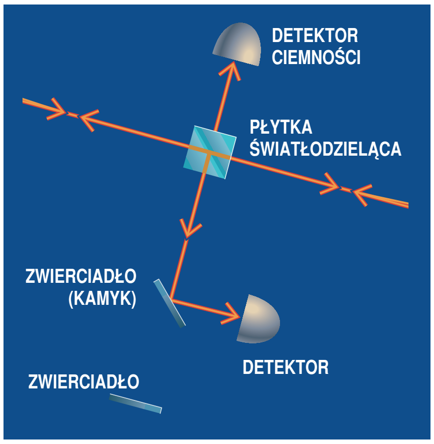
Ten właśnie foton wchodził do interferometru (dla prostoty używaliśmy interferometru trochę różniącego się od proponowanego przez Elitzura i Vaidmana). Zwierciadła i płytka światłodzieląca były tak ustawione, że prawie wszystkie fotony wychodziły po tej samej drodze, po której weszły do interferometru (odpowiada to padaniu fotonów na detektor światła w eksperymencie Elitzura–Vaidmana lub powstawaniu jasnego prążka w doświadczeniu z dwiema szczelinami). Kiedy nie było kamyka, w przypadku interferencji destruktywnej (w doświadczeniu z dwiema szczelinami jest to odpowiednik ciemnych prążków) szansa, aby foton trafił do detektora ciemności, była znikoma [*górna ilustracja na następnej stronie*].

Jednak wprowadzenie kamyka na jedną ze ścieżek zmieniło tę szansę. Kamy-



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

PRZEDSTAWIENIE układu Elitzura–Vaidmana, wykorzystującego światło z konwertera, które pada na płytkę światłodzielącą, odbija się od każdego z dwóch zwierciadeł i w drodze powrotnej interferuje ze sobą w płytce światłodzielącej *(u góry)*. Do detektora ciemności światło w ogóle nie dociera (odpowiada to interferencji destruktywnej; interferencja konstruktywna występuje w kierunku, z którego leciał foton). Jeżeli zwierciadło „kamyk” zostanie umieszczone na drodze światła, to na płytce światłodzielącej nie wystąpi interferencja, a na detektor ciemności od czasu do czasu będą padać fotony.



kiem było małe zwierciadło, które kierowało światło do innego detektora (detektora kamyka). Przekonaliśmy się wówczas, że w mniej więcej połowie przypadków detektor kamyka zarejestrował foton, podczas gdy detektor ciemności zadziałał, też mniej więcej, co czwarty raz (w pozostałych przypadkach foton opuszczał interferometr po tej samej drodze, po której do niego wszedł, nie dając żadnej informacji). Każde kliknięcie detektora ciemności świadczyło o wykryciu kamyka bez oddziaływania z nim.

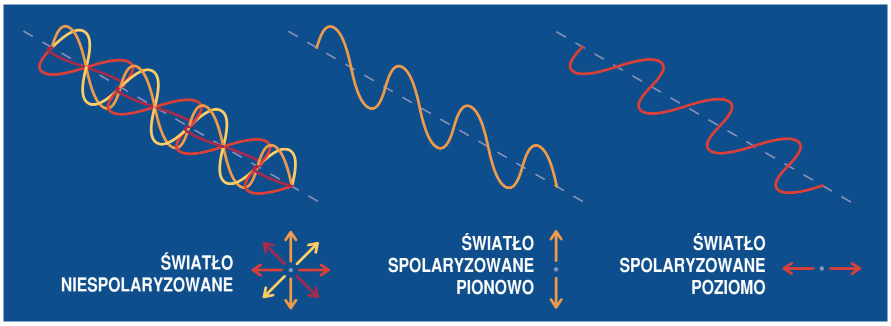
Prostym rozszerzeniem naszej metody było stopniowe redukowanie zdolności odbijającej płytki światłodzielącej, co zmniejszało szansę odbicia fotonów w kierunku ścieżki, na której znajdowało się zwierciadło kierujące fotony do detektora kamyka. Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi stwierdziliśmy wówczas, że prawdopodobieństwa trafiania fotonów do detektorów kamyka i ciemności coraz bardziej zbliżały się do siebie. Oznacza to, że stosując bardzo słabo odbijającą płytkę światłodzielącą, w układzie Elitzura–Vaidmana można przeprowadzić blisko połowę pomiarów bez oddziaływania (przypadki, w których fotony opuszczają interferometr po tej samej drodze, po której przyszły, nie są traktowane jako pomiary).

Kwantowy efekt Zenona

Pojawiło się natychmiast pytanie: czy 50% to wszystko, co możemy osiągnąć? Rozgorzała wśród nas poważna, często gorąca dyskusja, w której przeważał pogląd, że żadna zmiana układu nie zwiększy tej szansy. Jednak w styczniu 1994 roku przyjechał do Innsbrucku z miesięczną wizytą Mark A. Kasevich ze Stanford University i w czasie swojego pobytu zaproponował nam takie rozwiązanie, które – gdyby udało się je zrealizować – umożliwiłoby wykrywanie obiektów bez oddziaływania z nimi prawie za każdym razem. Nie pierwszy i – mamy nadzieję – nie ostatni raz kwantowy optymizm zatriumfował nad kwantowym pesymizmem.

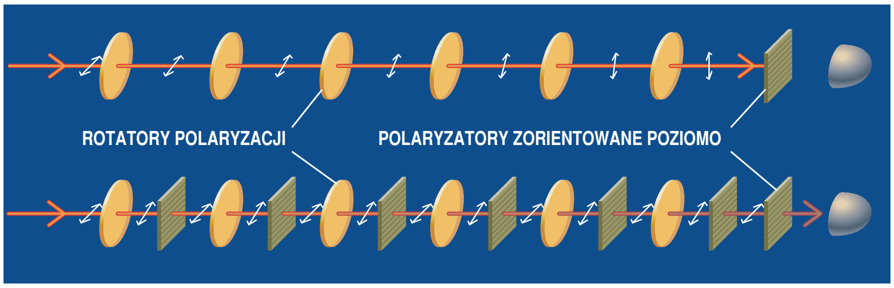
Ta nowa metoda w gruncie rzeczy polega na wykorzystaniu innego dziwnego zjawiska kwantowego, które w 1977 roku po raz pierwszy szczegółowo omówili Baidyanath Misra, obecnie przebywający na Uniwersytecie w Brukseli, oraz E. C. George Sudarshan z University of Texas w Austin. Zasadniczo układ kwantowy jest uwięziony w swoim stanie początkowym, chociaż pozostawiony sam sobie mógłby ewoluować do jakiegoś innego stanu. Jest to możliwe z powodu niezwykłego wpływu, jaki pomiary wywierają na układy kwantowe. Zjawisko to nazywa się kwantowym efektem Zenona, ponieważ przypomina słynny paradoks greckiego filozofa, który negował możliwość ruchu lecącej strzały, uzasadniając to tym, że w każdym momencie lotu jej położenie jest jakby „zamrożone”. Jest ono także znane jako efekt pilnowanego czajnika, co jest odwołaniem do aforyzmu o gotującej się wodzie. Wszyscy wiemy, że samo pilnowanie czajnika nie powinno mieć (i nie ma) żadnego wpływu na to, kiedy woda się zagotuje. Natomiast w mechanice kwantowej taki efekt rzeczywiście występuje – pomiar wpływa na jego wynik (zasada ta nazywa się postulatem rzutowania).

Kasevich w istocie powtórzył najprostszy wariant zjawiska, które w 1980 roku pierwszy postulował Asher Peres z Izraelskiego Instytutu Technologicznego Technion. Wykorzystuje się tu jeszcze jedną własność światła, a mianowicie polaryzację. Polaryzacja to kierunek drgań fal świetlnych – w górę i w dół dla światła pionowo spolaryzowanego i z prawej do lewej dla światła spolaryzowanego poziomo. Drgania te zawsze zachodzą pod kątem prostym do kierunku rozchodzenia się światła. Światło słoneczne i pochodzące z innych typowych źródeł na ogół oscyluje we wszystkich kierunkach, ale tu będziemy mieli do czynienia przeważnie z polaryzacją pionową i poziomą.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

POLARYZACJA to zjawisko, które odnosi się do kierunku drgań fal świetlnych rozchodzących się w przestrzeni.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

KWANTOWY EFEKT ZENONA można przedstawić za pomocą urządzeń, które obracają kierunek polaryzacji o 15°. Po przejściu przez sześć takich urządzeń (rotatorów) polaryzacja fotonu zmieni się z poziomej na pionową i foton zostanie zaabsorbowany przez polaryzator *(górny rząd)*. Natomiast ustawiając na przemian rotatory i polaryzatory zapobiega się obrotowi polaryzacji *(dolny rząd)*.

Rozważmy foton, który przechodzi przez układ, powiedzmy, 6 urządzeń, z których każde nieco skręca kierunek polaryzacji światła, co w rezultacie prowadzi do tego, że foton, który początkowo był spolaryzowany poziomo, wychodzi z układu spolaryzowany pionowo [*ilustracja powyżej*]. Takimi urządzeniami skręcającymi mogą być na przykład szklane komórki z roztworem cukru w wodzie. Na końcu drogi biegnącej przez układ foton trafia na polaryzator – urządzenie, które przepuszcza fotony o określonej polaryzacji, absorbuje zaś te o polaryzacji do niej prostopadłej. W tym konkretnym eksperymencie myślowym polaryzator przepuszcza tylko światło spolaryzowane poziomo, które następnie trafia do detektora.

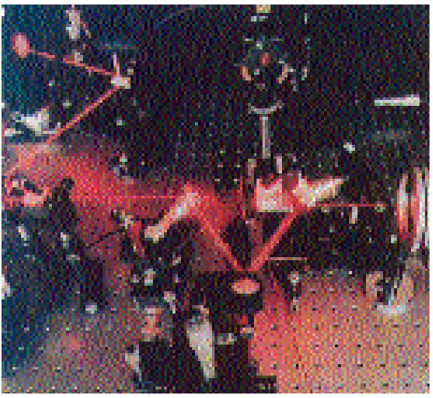
Zaczniemy od fotonu spolaryzowanego poziomo i przyjmiemy, że każda optycznie czynna komórka (rotator polaryzacji) skręca kierunek polaryzacji o 15° . Oczywiste jest więc, że foton nigdy nie trafi do detektora, ponieważ po przejściu przez wszystkie komórki kierunek jego polaryzacji zmieni się o 90° (15° po każdej z sześciu komórek), a zatem będzie spolaryzowany pionowo. Taki foton zostanie zaabsorbowany przez polaryzator. Stopniowa rotacja kierunku polaryzacji jest ewolucją kwantową, której chcemy zapobiec.

Sztuki tej można dokazać, przeplatając polaryzatory o orientacji poziomej z rotatorami polaryzacji. Wtedy po przejściu przez pierwszy rotator polaryzacja światła tylko trochę będzie się różnić od poziomej. Oznacza to, że szansa na absorpcję fotonu przez pierwszy polaryzator jest niewielka, bo zaledwie 6.7%. (Wartość tę otrzymuje się z obliczenia kwadratu sinusa kąta obrotu.)

Jeśli foton nie zostanie zaabsorbowany przez pierwszy polaryzator, ponownie znajdzie się w stanie polaryzacji poziomej – musi tak być, ponieważ jest to jedyny możliwy stan polaryzacji światła, które przechodzi przez polaryzator zorientowany poziomo. Po przejściu przez drugi rotator kierunek polaryzacji światła znowu zostanie obrócony o 15° względem horyzontu i szansa absorpcji przez drugi polaryzator będzie równie mała jak poprzednio; światło przepuszczone będzie oczywiście ponownie spolaryzowane poziomo. Proces ten powtarza się aż do momentu, w którym foton dochodzi do ostatniego polaryzatora.

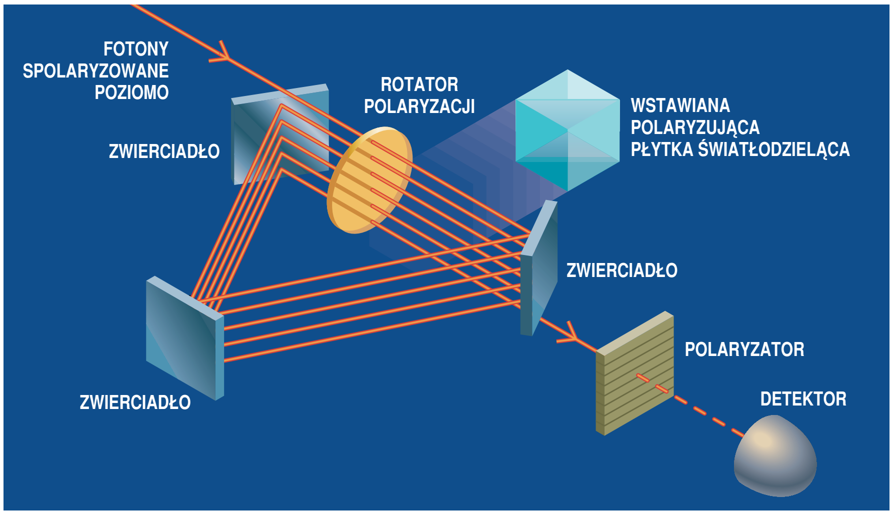
Padający foton ma dwie trzecie szans przejścia przez 6 polaryzatorów ustawionych między rotatorami polaryzacji i trafienia do detektora; prawdopodobieństwo to zostało obliczone ze wzoru $(\cos^2(15°))^6$. Jeżeli zwiększymy liczbę etapów, zmniejszając odpowiednio kąt obrotu kierunku polaryzacji na każdym etapie (do kąta równego 90° podzielonego przez liczbę etapów), prawdopodobieństwo przepuszczenia fotonu wzrośnie. W przypadku 20 etapów prawdopodobieństwo, że foton osiągnie detektor, jest bliskie 90%. Gdybyśmy mogli zbudować układ składający się z 2500 etapów, prawdopodobieństwo, że foton zostanie zaabsorbowany przez jeden z polaryzatorów, wyniosłoby tylko jedną tysięczną. A gdyby było nieskończenie dużo etapów, to foton zawsze przechodziłby przez układ. W ten sposób całkowicie powstrzymalibyśmy obrót kierunku polaryzacji światła.

Do obserwacji kwantowego zjawiska Zenona użyliśmy tego samego kryształu nieliniowego, którym poprzednio posłużyliśmy się do otrzymania pojedynczego fotonu. Zamiast 6 rotatorów i 6 polaryzatorów użyliśmy tylko po jednym z tych elementów; aby uzyskać taki sam efekt, zmusiliśmy foton do sześciokrotnego przejścia przez układ, stosując w tym celu trzy zwierciadła, które stworzyły coś w rodzaju spiralnej klatki schodowej [*ilustracja z lewej*]. Gdy w układzie nie ma polaryzatora, foton wychodzący z takiej „klatki schodowej" jest zawsze spolaryzowany pionowo. Kiedy jest polaryzator, foton wykazuje polaryzację poziomą (o ile polaryzator go nie zatrzyma). W naszym doświadczeniu o 6 cyklach takie przypadki pojawiają się z grubsza dwie trzecie razy, tak jak to przewidywaliśmy na podstawie analizy dokonanej w eksperymencie myślowym.



MICHAEL RECK *Uniwersytet w Innsbrucku*

DOŚWIADCZALNA REALIZACJA kwantowego efektu Zenona za pomocą układu, w którym foton porusza się po spirali w taki sposób, że sześciokrotnie przechodzi przez rotator polaryzacji. Wstawienie do układu polaryzatora powstrzymuje obrót kierunku polaryzacji fotonu.



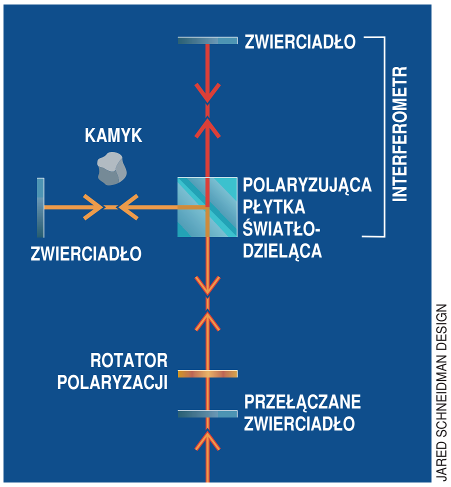
JARED SCHNEIDMAN DESIGN

Następnie rozpoczęliśmy niezwykle efektywne pomiary bez oddziaływania, tzn. wykrywanie nieprzezroczystego obiektu całkowicie bez udziału fotonów, które by nań padały. Zaprojektowaliśmy układ, który w pewnym stopniu był hybrydą przypadku Zenona i oryginalnej metody Elitzura–Vaidmana.

Do układu wpuszcza się spolaryzowany poziomo foton, który przed wyjściem przechodzi kilka cykli (powiedzmy, ponownie 6). (W tym celu potrzebne jest zwierciadło, które można bardzo szybko „włączać i wyłączać”; na szczęście takie lustra, którymi w rzeczywistości są dające się przełączać urządzenia interferencyjne, zostały już opracowane dla laserów impulsowych[2].) Z jednej strony układu znajduje się urządzenie, które w każdym cyklu obraca kierunek polaryzacji fotonu o 15°. Z drugiej strony umieszczony jest interferometr polaryzacyjny, który składa się z polaryzującej płytki światłodzielącej i dwóch równej długości ramion interferometru ze zwierciadłami na końcach [*ilustracja z prawej*].

Polaryzująca płytka światłodzieląca całkowicie przepuszcza światło spolaryzowane poziomo i całkowicie odbija światło spolaryzowane pionowo; w istocie wybór między transmisją i odbiciem jest analogiczny do wyboru jednej z dwóch ścieżek w doświadczeniu z dwiema szczelinami. Pod nieobecność obiektu w interferometrze polaryzacyjnym światło jest dzielone przez płytkę światłodzielącą zależnie od swojej polaryzacji, po czym w każdym z ramion odbija się od zwierciadła i ponownie łączy w płytce światłodzielącej. W rezultacie foton jest dokładnie w tym samym stanie, w jakim był przed wejściem do interferometru (tzn. jego kierunek polaryzacji jest obrócony o 15° w stronę pionu). A zatem po 6 cyklach kierunek polaryzacji zostanie tak skręcony, że ustawi się pionowo.

Zachowanie to ulega zmianie po umieszczeniu nieprzezroczystego obiektu w tym ramieniu interferometru, w którym rozchodzi się tylko światło spolaryzowane pionowo. Sytuacja staje się analogiczna do wstawienia 6 polaryzatorów w doświadczeniu z kwantowym efektem Zenona. Po pierwszym cyklu szansa na to, że foton – którego polaryzacja została obrócona zaledwie o 15° względem horyzontu – wejdzie na ścieżkę dozwoloną dla polaryzacji pionowej (i zostanie następnie zaabsorbowany przez obiekt) jest bardzo mała (6.7% – tyle, ile w eksperymencie myślowym Zenona). Jeżeli absorpcja nie zachodzi, to znaczy, że foton wszedł na ścieżkę przeznaczoną dla polaryzacji poziomej, gdzie jego polaryzacja zostanie ustawiona dokładnie poziomo.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

EFEKTYWNE POMIARY bez oddziaływania wymagają połączenia zestawu do realizacji kwantowego efektu Zenona z układem Elitzura–Vaidmana. Foton wchodzi od strony przełączanego zwierciadła i sześciokrotnie przebiega układ przed opuszczeniem go przez to zwierciadło. Jeżeli na jednej ze ścieżek fotonu leży kamyk, końcowa polaryzacja fotonu jest nadal pozioma; w przeciwnym razie zostaje obrócona do polaryzacji pionowej.

Tak jak w przypadku efektu Zenona cały proces powtarza się w każdym cyklu, dopóki ostatecznie, po 6 cyklach, dolne zwierciadło nie zostanie wyłączone i wtedy foton opuści układ. Mierząc polaryzację fotonu, przekonujemy się, że jest ona nadal pozioma, co oznacza, że w interferometrze tkwi przeszkoda. W przeciwnym razie wychodzący foton musiałby mieć polaryzację pionową. Stosując więcej cykli, możemy sprawić, że prawdopodobieństwo absorpcji fotonu przez obiekt będzie dowolnie małe. Pierwsze rezultaty uzyskane w nowych eksperymentach przeprowadzonych w Los Alamos National Laboratory wykazały, że bez oddziaływania można wykonać blisko 70% pomiarów. Mamy nadzieję wkrótce poprawić ten wynik do 85%.

Kwantowa magia

Co dobrego wynika z tych wszystkich kwantowych sztuczek magicznych? Sądzimy, że obecna sytuacja przypomina tę z okresu wczesnych lat lasera, kiedy naukowcy wiedzieli, że mają doskonałe narzędzie do rozwiązania wielu nie znanych im jeszcze problemów. Nowa metoda pomiaru bez oddziaływania mogłaby znaleźć zastosowanie na przykład jako dosyć niezwykły sposób fotografowania, dzięki któremu uzyskuje się obraz obiektu bez wystawiania go na działanie światła.

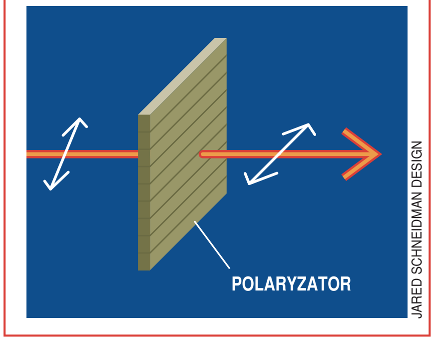
Proces „fotografowania” przebiegałby w następujący sposób: zamiast wpuszczać do układu pojedynczy foton, wpuścilibyśmy wiele fotonów, jeden na piksel, i użylibyśmy ich do przeprowadzenia pomiaru bez oddziaływania. W obszarach, w których obiekt nie blokuje drogi światła w interferometrze, pozioma polaryzacja fotonów podlegałaby zaplanowanej stopniowej rotacji aż do ustawienia pionowego. Natomiast w obszarach, w których obiekt blokuje drogę światła, kilka fotonów zostałoby zaabsorbowanych; reszta miałaby polaryzację uwięzioną w kierunku horyzontalnym. W końcu dzięki zastosowaniu filtru polaryzacyjnego otrzymalibyśmy zdjęcie fotonów, które by wykonały żądaną liczbę cykli.

Gdyby filtr został zorientowany poziomo, otrzymalibyśmy obraz obiektu (pozytyw); gdyby natomiast był ustawiony pionowo, otrzymalibyśmy negatyw. W obu przypadkach obraz tworzą fotony, które nigdy nie dotknęły obiektu. Metody te da się stosować również w przypadku obiektu półprzezroczystego i być może dadzą się one tak dalece uogólnić, że pozwolą też rozpoznać jego kolory (aczkolwiek te cele byłoby trudniej osiągnąć).

Nie jest wykluczone, że jakaś odmiana takiego sposobu uzyskiwania obrazu pewnego dnia okaże się cenna dla medycyny – na przykład do uzyskiwania

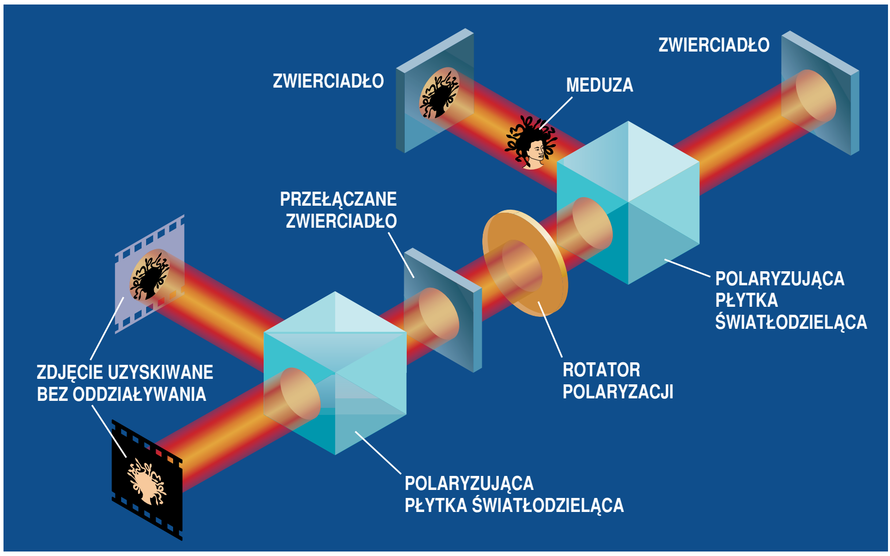
Postulat rzutowania

Postulat ten mówi, że w dowolnym pomiarze dokonanym na układzie kwantowym można uzyskać tylko określone wyniki. Ponadto po pomiarze układ kwantowy jest w stanie zdeterminowanym przez otrzymane wyniki. Tak więc foton, który przeszedł przez polaryzator zorientowany poziomo, jest z konieczności spolaryzowany poziomo, mimo że początkowo był spolaryzowany niemal pionowo (polaryzator eliminuje pionową składową polaryzacji). W tym wypadku prawdopodobieństwo transmisji jest jednak małe.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

FOTOGRAFIĘ także można uzyskać za pomocą metod bez oddziaływania. W ten sposób obiekt – „Meduza”, na którą nie można bezpośrednio spojrzeć – zaabsorbuje zaledwie kilka fotonów.



JARED SCHNEIDMAN DESIGN

obrazu żywych komórek. Wyobraźmy sobie, że potrafimy prześwietlić kogoś promieniami rentgenowskimi bez narażania jego komórek na ich przenikliwe działanie. Taka technika obrazowania byłaby dla pacjentów mniej ryzykowna od powszechnie stosowanych prześwietleń. (W praktyce jednak uzyskanie zdjęcia za pomocą promieni X jest mało prawdopodobne z uwagi na trudności wykonania elementów optycznych dla tej długości fali promieniowania elektromagnetycznego.)

Przykładem dużo bardziej realnego zastosowania jest obrazowanie chmury ultrazimnych atomów, które ostatnio są wytwarzane w wielu laboratoriach. Najzimniejsze z nich ulegają kondensacji Bosego–Einsteina, czyli przechodzą do nowego rodzaju stanu kwantowego, w którym atomy zachowują się kolektywnie, tzn. jakby stanowiły jedność. W tego rodzaju chmurze każdy atom jest tak zimny – co oznacza, że porusza się tak powoli – że nawet pojedynczy foton może go wybić na zewnątrz. Początkowo nie było żadnego sposobu otrzymania obrazu kondensacji bez zniszczenia chmury. Metoda pomiarów bez oddziaływania może okazać się jedynym sposobem zobrazowania takiego zbioru atomów.

Oprócz obrazowania obiektów kwantowych procedury bez oddziaływania mogłyby również tworzyć pewne ich rodzaje. Za pomocą tego typu techniki można by mianowicie stworzyć „kota Schrödingera”, ulubioną teoretyczną istotę mechaniki kwantowej. Kwantowy kot jest tak spreparowany, że istnieje jednocześnie w dwóch stanach: jest zarazem żywy i martwy, co jest superpozycją tych dwóch stanów. Na początku ubiegłego roku pracownicy National Institute of Standards and Technology zdołali stworzyć pierwszą wersję kota Schrödingera – a właściwie koteczka – z jonu berylu. Aby otrzymać jon istniejący jednocześnie w dwóch odległych od siebie o 83 nm miejscach, co w skali kwantowej jest ogromną odległością, posłużyli się kombinacją laserów i pól elektromagnetycznych.

Gdyby taki jon był badany za pomocą metody bez oddziaływania, wówczas foton analizujący jego stan także znalazłby się w stanie superponowanym. Okazałoby się, że jednocześnie jest spolaryzowany poziomo i pionowo. Rzeczywiście, w układzie doświadczalnym takim jak wyżej omówiony można by grupę – powiedzmy, 20 fotonów – umieścić w jednym stanie superponowanym.

Każdy z tych fotonów „wiedziałby”, że ma tę samą polaryzację co pozostałe, ale żaden z nich nie wiedziałby, jaką on sam ma polaryzację. Fotony pozostawałyby w stanie superpozycji, dopóki pomiar nie wykazałby im, że wszystkie są spolaryzowane poziomo lub też że wszystkie są spolaryzowane pionowo. Pokaźnych rozmiarów pęk fotonów pozostających w tym szczególnym stanie byłby dowodem na to, że zjawiska kwantowe mogą zachodzić na skalę makroskopową.

Leżące poza zasięgiem codziennego doświadczenia pojęcie pomiarów bez oddziaływania jawi się nam czymś niesamowitym, jeśli nie wręcz bezsensownym. Być może wyda się ono mniej dziwne, jeśli przypomnimy sobie, że mechanika kwantowa działa w sferze potencjalności. Chodzi o to, że mogłoby wystąpić oddziaływanie, którego pojawienia dałoby się uniknąć. A jeśli nadal nie będziemy umieli się z tym oswoić, należy pocieszyć się faktem, że nawet fizykom przez długie lata trudno było zaakceptować dziwność świata kwantów. Zjawiska leżące u podstaw tych kwantowych sztuczek magicznych – komplementarność, falowy i cząstkowy charakter światła oraz natura pomiarów kwantowych – znane były od 1930 roku. Dopiero niedawno jednak fizycy zaczęli stosować te idee do odkrywania nowych zjawisk w przetwarzaniu informacji kwantowych, ze zdolnością widzenia w ciemności włącznie.

Tłumaczyła
Aleksandra Kopystyńska

Przypisy tłumaczki:
[1] W języku polskim używa się też nazwy pomiary nieniszczące.
[2] W laserach impulsowych zwykle stosuje się tzw. komórkę Pockelsa.

Informacje o autorach

PAUL KWIAT, HARALD WEINFURTER i ANTON ZEILINGER współpracowali bez wzajemnego oddziaływania na terenie Uniwersytetu w Innsbrucku. Kwiat, który jest teraz J. R. Oppenheimer Fellow w Los Alamos National Laboratory, doktorat uzyskał w University of California w Berkeley. Poważnie studiuje aikido i stara się zostać nie najgorszym flecistą. Weinfurter doktoryzował się na Politechnice Wiedeńskiej i następnie pracował w Hahn-Meitner Institut w Berlinie. Obecnie korzysta ze wszystkich przywilejów dostępnych stypendyście Austriackiej Akademii Nauk, jak również z relaksującego trybu życia w Innsbrucku i jego okolicach. Zeilinger, członek Austriackiej Akademii Nauk, doktorat uzyskał na Uniwersytecie Wiedeńskim i następnie pracował w przeróżnych miejscach na świecie. W nielicznych wolnych chwilach gra na kontrabasie i kolekcjonuje stare mapy, szczególnie te z czasów Monarchii Austro-Węgierskiej.

Literatura uzupełniająca

QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER. Richard P. Feynman; Princeton University Press, 1985.

QUANTUM MECHANICAL INTERACTION-FREE MEASUREMENTS. Avshalom C. Elitzur i Lev Vaidman, *Foundations of Physics*, vol. 23, nr 7, ss. 987-997, VII/1993.

INTERACTION-FREE MEASUREMENT. P. G. Kwiat, H. Weinfurter, T. Herzog, A. Zeilinger i M. A. Kasevich, *Physical Review Letters*, vol. 74, nr 24, ss. 4763-4766, 12 VI 1995.

FILOZOFIA TEORII KWANTÓW. John Horgan, *Świat Nauki*, IX/1992, s. 78.

Dyskusję na temat doświadczeń dotyczących pomiarów bez oddziaływania można znaleźć w World Wide Web pod adresami: http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/#Inter oraz http://p23.lanl.gov/Quantum/kwiat/ifm-folder/ifmtext.htm